N° 82-003-X au catalogue
ISSN 1209-1375

Rapports sur la santé

Exposition à la pollution de l'air par les matières particulaires au Canada

par Lauren Pinault, Aaron van Donkelaar et Randall V. Martin

Date de diffusion : le 15 mars 2017

Statistique Canada Statistics Canada

Canada

Comment obtenir d'autres renseignements

Pour toute demande de renseignements au sujet de ce produit ou sur l'ensemble des données et des services de Statistique Canada, visiter notre site Web à www.statcan.gc.ca.

Vous pouvez également communiquer avec nous par :

Courriel à STATCAN.infostats-infostats.STATCAN@canada.ca

Téléphone entre 8 h 30 et 16 h 30 du lundi au vendredi aux numéros suivants :

• Service de renseignements statistiques	1-800-263-1136
• Service national d'appareils de télécommunications pour les malentendants	1-800-363-7629
• Télécopieur	1-514-283-9350

Programme des services de dépôt

• Service de renseignements	1-800-635-7943
• Télécopieur	1-800-565-7757

Normes de service à la clientèle

Statistique Canada s'engage à fournir à ses clients des services rapides, fiables et courtois. À cet égard, notre organisme s'est doté de normes de service à la clientèle que les employés observent. Pour obtenir une copie de ces normes de service, veuillez communiquer avec Statistique Canada au numéro sans frais 1-800-263-1136. Les normes de service sont aussi publiées sur le site www.statcan.gc.ca sous « Contactez-nous » > « Normes de service à la clientèle ».

Note de reconnaissance

Le succès du système statistique du Canada repose sur un partenariat bien établi entre Statistique Canada et la population du Canada, les entreprises, les administrations et les autres organismes. Sans cette collaboration et cette bonne volonté, il serait impossible de produire des statistiques exactes et actuelles.

Signes conventionnels dans les tableaux

Les signes conventionnels suivants sont employés dans les publications de Statistique Canada :

.	indisponible pour toute période de référence
..	indisponible pour une période de référence précise
...	n'ayant pas lieu de figurer
0	zéro absolu ou valeur arrondie à zéro
0^s	valeur arrondie à 0 (zéro) là où il y a une distinction importante entre le zéro absolu et la valeur arrondie
^{p}	provisoire
^{r}	révisé
x	confidentiel en vertu des dispositions de la *Loi sur la statistique*
^{E}	à utiliser avec prudence
F	trop peu fiable pour être publié
*	valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence (p<0,05)

Publication autorisée par le ministre responsable de Statistique Canada

© Ministre de l'Industrie, 2017

Tous droits réservés. L'utilisation de la présente publication est assujettie aux modalités de l'entente de licence ouverte de Statistique Canada.

Une version HTML **est aussi disponible.**

This publication is also available in English.

Exposition à la pollution de l'air par les matières particulaires au Canada

par Lauren Pinault, Aaron van Donkelaar et Randall V. Martin

Résumé

Contexte : L'exposition aux matières particulaires ($PM_{2,5}$) ambiantes a été associée à un risque accru de mortalité de cause non accidentelle ou d'une maladie cardiovasculaire ou respiratoire au Canada. Les recherches fondées sur des cohortes canadiennes donnent à penser que l'exposition aux $PM_{2,5}$ varie selon des caractéristiques démographiques et socioéconomiques. Les études sur le NO_2, un autre polluant, indiquent que les personnes ayant un statut socioéconomique plus faible et certains groupes de minorités visibles y sont plus exposés dans les centres urbains.

Données et méthodologie : Les $PM_{2,5}$ résidentielles à l'échelle nationale ont été évaluées à partir d'une couche spatiale d'environ 1 km^2 pour les répondants du questionnaire détaillé du Recensement de 2006. Des estimations pondérées des $PM_{2,5}$ à partir des estimations au niveau personnel ont été déterminées pour les populations de race blanche, les Autochtones, les minorités visibles et les immigrants, ainsi que pour les groupes socioéconomiques (revenu du ménage, plus haut niveau de scolarité) et stratifiées par noyau urbain, banlieue urbaine et résidence rurale. Des statistiques descriptives ont été fournies aux fins de comparaisons sélectionnées.

Résultats : Au Canada, l'exposition aux $PM_{2,5}$ était plus élevée de 1,61 µg/m^3 dans le cas des populations de minorités visibles (comparativement aux populations de race blanche), et de 1,55 µg/m^3 dans le cas des immigrants (comparativement aux non-immigrants). Lorsqu'on a pris en considération les pourcentages relativement élevés de ces groupes dans les grandes villes, les différences dans l'exposition observées dans les noyaux urbains étaient beaucoup plus faibles. L'exposition parmi les immigrants urbains n'a pas diminué de façon significative avec le temps depuis l'immigration (< 0,5 µg/m^3 entre deux années). Dans les noyaux urbains, les résidents appartenant à des ménages à faible revenu présentaient des taux d'exposition légèrement plus élevés (0,56 µg/m^3) que les personnes qui n'appartenaient pas à des ménages à faible revenu.

Interprétation : Les différences dans les taux d'exposition aux $PM_{2,5}$ entre les groupes de population particuliers sont attribuables, au moins en partie, aux pourcentages plus élevés de ces groupes qui vivent dans des noyaux urbains où les niveaux de pollution de l'air sont élevés.

Mots clés : Exposition environnementale, surveillance environnementale, immigrants, santé rurale, facteurs socioéconomiques, santé urbaine, minorité visible

Les matières particulaires ($PM_{2,5}$) constituent l'une des composantes principales de la pollution de l'air. Elles désignent un mélange de particules de moins de 2,5 microns de diamètre, y compris les aérosols, la fumée et la poussière. Selon l'étude sur la charge mondiale de morbidité, la pollution de l'air par les $PM_{2,5}$ est la cause d'environ 2,9 millions de décès partout dans le monde tous les ans[1], et elle est associée à un risque accru de mortalité de cause non accidentelle liée à des maladies circulatoires et respiratoires[2]. Dans une étude faisant appel à la Cohorte santé et environnement du recensement canadien de 1991 (CSERCan)[3], cette association a été observée au Canada, un pays où le niveau de pollution de l'air ambiant est relativement faible. Une étude subséquente faisant appel à l'Enquête sur la santé dans les collectivités canadiennes (ESCC) et à la cohorte de mortalité corrigée pour les covariantes comportementales (par exemple, le tabagisme) a conclu à un risque de mortalité accru à un seuil de concentration plus faible[4]. L'analyse de l'ESCC a utilisé un modèle national à petite échelle (1 km^2) de $PM_{2,5}$, permettant ainsi d'obtenir des estimations d'exposition plus précises que les modèles antérieurs.

Pour bien comprendre les effets de la pollution de l'air sur la santé, il importe de décrire la façon dont l'exposition varie parmi les groupes démographiques et socioéconomiques. Au Canada, les modèles de régression de l'utilisation des terres élaborés pour le dioxyde d'azote (NO_2) dans les centres urbains permettent aux chercheurs d'évaluer les différences d'exposition intra-urbaines[5-8]. Dans les grandes villes, l'exposition au NO_2 a tendance à être plus élevée parmi les populations de statut socioéconomique plus faible, même si les groupes touchés sont spécifiques à une ville donnée[9-12]. Une étude nationale menée aux États-Unis a indiqué une exposition plus élevée au NO_2 parmi les populations autres que de race blanche à faible revenu, particulièrement dans les centres urbains[13]. L'ensemble de données élaborées dans le cadre de l'étude de l'ESCC[4] offre la possibilité d'examiner les modèles nationaux d'exposition aux $PM_{2,5}$ au Canada.

Des groupes particuliers, tels que les récents immigrants, qui ont tendance à être généralement en meilleure santé, pourraient être plus exposés aux $PM_{2,5}$ (par exemple, une quantité disproportionnée d'immigrants pourraient vivre dans des grandes villes). Cela complique la tâche consistant à évaluer les associations concentration-réponse pour l'ensemble de la population canadienne. Il est utile de déterminer les groupes plus ou moins exposés à l'échelle nationale et dans les régions géographiques où l'on note des différences (urbaines par rapport à rurales) afin d'estimer les effets sur la santé et les associations entre l'exposition et la réponse. La présente étude (modélisée méthodologiquement sur l'étude américaine sur le NO_2)[13] décrit l'exposition résidentielle aux $PM_{2,5}$ ambiantes selon l'appartenance à une minorité visible, le statut d'immigrant et le statut socioéconomique au Canada, tout en stratifiant l'analyse à travers la ligne de partage urbaine-rurale.

Auteurs : Lauren Pinault (lauren.pinault@canada.ca) travaille au sein de la Division de l'analyse de la santé de Statistique Canada, à Ottawa, en Ontario. Aaron van Donkelaar et Randall V. Martin travaillent au sein du Département de physique et science atmosphérique de l'Université de Dalhousie, à Halifax, en Nouvelle-Écosse. Randall V. Martin œuvre également au Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, à Cambridge, au Massachusetts..

Données et méthodologie

Les caractéristiques de la population canadienne sont tirées du questionnaire détaillé du Recensement de 2006, administré à un échantillon de 20 % de la population (sauf dans certaines régions éloignées et réserves indiennes, où toute la population a été échantillonnée)[14]. Le Recensement de 2006 présentait un taux de sous-dénombrement net de 2,67 %[15]. Les participants institutionnalisés ont été exclus de cette étude, car ils ne fournissaient aucune information sur les caractéristiques d'intérêt. Les résultats du questionnaire détaillé ont été pondérés afin de refléter la situation démographique et socioéconomique de l'ensemble de la population[15].

Les variables dont on a tenu compte dans l'étude étaient les suivantes : l'âge; le statut d'Autochtone, de minorité visible et d'immigration; le nombre d'années depuis l'immigration; le revenu du ménage; le statut de faible revenu; la participation active (personnes âgées de 25 ans ou plus) et le niveau de scolarité (personnes âgées de 25 ans ou plus). On entend par « minorités visibles » les personnes, autres que les Autochtones, qui ne sont pas de race blanche ou qui n'ont pas la peau blanche[14]. Le statut de faible revenu était tiré des seuils de faible revenu (SFR), fondés sur le revenu du ménage après impôt, la taille du ménage et le secteur de résidence. Le SFR permet de cibler les personnes qui dépensent en nourriture, en logement et en vêtements 20 % de leur revenu de plus que le ménage moyen dans leur région[14]. Les variables géographiques étaient le noyau urbain / la banlieue urbaine / la région rurale et la région métropolitaine de recensement (RMR) / l'agglomération de recensement (AR). On entend par « noyau urbain » la région urbaine à l'intérieur d'une RMR ou d'une AR ayant une population d'au moins 50 000 habitants (RMR) ou 10 000 habitants (AR). On entend par « banlieue urbaine » les régions urbaines à l'intérieur d'une RMR ou d'une AR qui ne sont pas contigües au noyau principal. On entend par « régions rurales » toutes les autres régions ayant une densité de population inférieure à 400 personnes par km^2[2,14].

Le lieu de résidence des participants au recensement non institutionnalisés a été cartographié dans un Système d'information géographique (SIG) (ArcGIS v. 10; ESRI) à l'aide du code postal indiqué dans le recensement et du Fichier de conversion des codes postaux plus (FCCP+, v6B) de Statistique Canada. Le FCCP+ utilise un algorithme d'attribution aléatoire pondéré selon la population afin de fournir un point de représentation géographique pour les codes postaux[16]. Les participants au recensement étaient spatialement couplés dans le SIG aux estimations rectangulaires de $PM_{2,5}$ à une résolution de 1 km^2 à partir d'un ensemble de données publiées pour 2006. L'ensemble de données sur les $PM_{2,5}$ était tiré d'extractions de l'épaisseur optique de colonnes d'air d'un spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) et comparé aux $PM_{2,5}$ près de la surface à l'aide des renseignements obtenus du modèle de transport chimique GEOS-Chem[17]. Une régression pondérée géographiquement (intégrant les estimations rectangulaires, les données sur l'utilisation du sol et les données de surveillance du sol) a été appliquée afin de produire une couche de surface de la moyenne annuelle de $PM_{2,5}$ à une résolution d'environ 1 km^2 [17]. Les estimations aberrantes de $PM_{2,5}$ (valeurs > 20 µg/m^3; moins de 1 % des participants) ont été exclues de l'analyse, car elles sont probablement attribuables à des problèmes de qualité des données associés aux extractions par satellite.

Des estimations de la moyenne (± écart-type) d'exposition aux $PM_{2,5}$ ont été obtenues pour certaines caractéristiques. Les moyennes ont été calculées pour l'ensemble de la population et pour les populations des noyaux urbains, des banlieues urbaines et des régions rurales. Des diagrammes ont été utilisés pour examiner les changements dans l'exposition moyenne selon l'âge et le revenu, selon la taille de la collectivité et, pour les immigrants, selon les années écoulées depuis l'immigration.

Pour comparer les différences dans l'exposition aux $PM_{2,5}$ parmi les groupes sélectionnés, on a utilisé le test de Student aux fins de test de signification. En raison du très grand échantillon (et par conséquent, des résultats hautement significatifs), la taille de l'effet de la valeur d de Cohen a été utilisée pour interpréter l'ampleur des différences entre les groupes[18,19]. La valeur d de Cohen est indépendante de la taille de l'échantillon; $d = 1$ signifie que les moyennes de groupe varient selon un écart-type. Selon Cohen, les définitions approximatives de la taille de l'effet sont les suivantes : faible ($d = 0,2$), moyen ($d = 0,5$) et important ($d = 0,8$)[18,19]. Pour déterminer s'il existe des différences dans l'exposition aux $PM_{2,5}$ dans les centres urbains, une mesure normalisée de l'inégalité (différence dans l'exposition entre les personnes de race blanche à revenu élevé (BRE) et les personnes de couleur à faible revenu (CFR))[13] a été calculée pour toutes les RMR. Une analyse de sensibilité a permis d'examiner la population urbaine par résidence dans la RMR de Toronto comparativement à d'autres noyaux urbains.

Résultats

Variations géographiques

Les estimations de l'exposition aux $PM_{2,5}$ ont été attribuées à 6 306 700 participants non institutionnalisés au Recensement de 2006. La moyenne nationale (écart-type) d'exposition était de 7,05 (5,57) µg/m^3, avec une fourchette de < 0,1 µg/m^3 à 19,1 µg/m^3.

L'estimation pour le noyau urbain était de 8,03 (4,90) µg/m^3. Les estimations moyennes pour les banlieues urbaines et les régions rurales étaient respectivement de 5,62 (4,24) µg/m^3 et 4,32 (2,77) µg/m^3—2,41 µg/m^3 et 3,71 µg/m^3 en deçà de celles des noyaux urbains ($p < 0,001$ pour les deux; banlieue urbaine : $d = 0,53$ et régions rurales : $d = 0,93$) (tableau 1). Les estimations d'exposition aux $PM_{2,5}$ étaient très élevées dans certaines parties du sud de l'Ontario (particulièrement près de Toronto et de Windsor) et dans les grandes villes (carte 1).

Âge

Contrairement aux variations géographiques, les différences dans l'exposition aux $PM_{2,5}$ parmi les groupes démographiques et socioéconomiques étaient faibles. Aucune association évidente n'était apparente selon l'âge, à l'exception des noyaux urbains, où les gens âgés de plus de 65 ans étaient légèrement plus exposés que ceux appartenant aux autres groupes d'âge ($p < 0{,}001$; $d = 0{,}05$). Pour examiner ces conclusions en détail, une moyenne (± 95 % CI) d'exposition aux $PM_{2,5}$ à tous les âges a été déterminée pour les participants des régions urbaines (figure 1). L'exposition était moins élevée pendant l'enfance, atteignait un sommet à 25 ans (8,25 µg/m³), diminuait

Tableau 1
Pourcentage de répartition et moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$), selon le lieu de résidence urbain/rural et certaines caractéristiques, population à domicile, Canada, 2006

	Répartition de la population (%)					Exposition aux $PM_{2,5}$ (µg/m³)							
						Total		Noyau urbain		Banlieu urbain		Région rurale	
Caractéristique	Total	Total	Noyau urbain	Banlieue urbaine	Région rurale	Région rurale	É.-T.	Région rurale	É.-T.	Région rurale	É.-T.	Région rurale	É.-T.
Total	100,0	100,0	70,0	10,1	19,8	7,05	5,57	8,03	4,90	5,62	4,24	4,32	2,77
Groupe d'âge													
Moins de 5 ans	5,4	100,0	70,3	10,6	19,1	6,94	5,41	7,86	4,99	5,55	4,10	4,29	2,53
5 à 17 ans	16,7	100,0	67,7	10,7	21,6	6,86	5,44	7,87	4,94	5,59	4,17	4,30	2,63
18 à 39 ans	29,1	100,0	74,3	9,3	16,4	7,23	5,52	8,06	4,92	5,62	4,21	4,33	2,72
40 à 65 ans	36,7	100,0	68,1	10,0	21,9	6,97	5,60	8,01	4,88	5,63	4,26	4,33	2,85
Plus de 65 ans	12,1	100,0	68,9	11,4	19,6	7,17	5,73	8,25	4,82	5,64	4,39	4,31	2,97
Minorité visible ou statut d'Autochtone													
Race blanche	80,1	100,0	65,9	11,7	22,4	6,84	5,68	7,89	5,05	5,65	4,30	4,37	3,01
Autochtone	3,6	100,0	44,9	11,8	43,4	5,29	3,60	7,00	4,74	4,71	3,13	3,67	1,47
Minorité visible	16,3	100,0	96,0	2,1	1,9	8,45	4,33	8,58	4,10	5,93	3,99	4,77	3,18
Sud-Asiatiques	4,1	100,0	96,8	1,6	1,6	8,36	4,30	8,46	4,14	5,86	3,78	5,02	3,07
Chinois	3,9	100,0	97,0	1,6	1,3	8,38	3,94	8,48	3,75	5,73	3,77	4,66	2,86
Noirs	2,5	100,0	94,9	2,3	2,7	8,71	4,54	8,89	4,18	6,10	4,31	4,65	3,44
Philippins	1,3	100,0	96,4	2,1	1,5	8,25	4,38	8,37	4,17	5,61	3,54	4,35	3,15
Latino-Américains	1,0	100,0	94,4	2,8	2,8	8,78	4,46	8,95	4,19	6,48	4,50	5,21	2,98
Arabes	0,9	100,0	96,3	1,9	1,8	8,73	4,37	8,87	4,05	5,38	3,66	4,61	3,39
Autre origine asiatique	2,0	100,0	94,7	3,0	2,2	8,31	4,54	8,47	4,30	6,04	3,89	4,69	3,05
Minorités visibles multiples	0,4	100,0	95,2	2,6	2,2	8,32	4,47	8,46	4,24	5,99	3,95	4,63	2,58
Autre minorité visible	0,2	100,0	95,1	2,3	2,6	8,68	4,52	8,83	4,22	6,43	4,14	4,94	4,33
Statut d'immigration													
Non-immigrant	79,3	100,0	64,9	11,8	23,3	6,73	5,52	7,81	5,02	5,58	4,23	4,29	2,73
Immigrant	20,7	100,0	89,8	3,9	6,3	8,28	4,82	8,63	4,26	6,07	4,23	4,73	3,29
Niveau de scolarité (plus de 25 ans)													
Niveau inférieur à un diplôme d'études secondaires	16,7	100,0	61,1	12,1	26,8	6,78	5,70	8,17	4,90	5,50	4,28	4,20	2,64
Diplôme d'études secondaires	16,1	100,0	69,4	10,6	19,9	7,08	5,64	8,06	4,92	5,73	4,34	4,38	2,97
Diplôme ou certificat non universitaire	21,8	100,0	69,3	10,6	20,1	6,98	5,58	7,93	4,94	5,64	4,27	4,39	2,93
Diplôme universitaire	14,0	100,0	82,6	6,3	11,0	7,59	5,37	8,17	4,77	5,66	4,07	4,39	2,89
Statut de participation à la population active (plus de 25 ans)													
Personne occupée	43,6	100,0	70,7	9,7	19,6	7,06	5,57	7,99	4,90	5,65	4,21	4,37	2,89
Personne au chômage	22,5	100,0	69,1	10,9	20,0	7,13	5,69	8,19	4,85	5,61	4,36	4,28	2,80
Personne inactive	2,5	100,0	67,4	9,4	23,2	7,02	5,79	8,30	4,86	5,34	4,27	3,99	2,36
Revenu du ménage ($)													
Moins de 30 000	17,7	100,0	69,6	9,9	20,4	7,21	5,67	8,37	4,79	5,51	4,35	4,11	2,36
30 000 à 50 000	18,6	100,0	67,4	10,2	22,4	7,05	5,73	8,21	4,89	5,59	4,32	4,23	2,66
50 000 à 90 000	31,7	100,0	68,1	10,7	21,1	6,94	5,60	7,96	4,95	5,62	4,25	4,34	2,85
Plus de 90 000	32,0	100,0	73,7	9,7	16,6	7,06	5,36	7,82	4,87	5,69	4,10	4,51	3,04
Statut de faible revenu[1]													
Faible revenu	11,2	100,0	84,7	6,3	9,1	7,94	5,43	8,52	4,57	5,59	4,52	4,21	2,89
Pas un faible revenu	87,0	100,0	69,1	10,7	20,2	6,98	5,68	7,96	4,96	5,64	4,31	4,37	3,06
Minorité visible et faible revenu[1]													
Race blanche et faible revenu	7,1	100,0	78,3	8,7	13,0	7,59	5,76	8,37	3,85	5,61	4,56	4,28	2,96
Race blanche et pas un faible revenu	73,0	100,0	65,0	12,0	23,1	6,78	5,71	7,84	5,09	5,65	4,32	4,38	3,08
Minorité visible et faible revenu	3,5	100,0	98,3	1,0	0,7	8,86	3,92	8,92	3,78	6,02	4,27	4,66	3,63
Minorité visible et pas un faible revenu	12,7	100,0	95,5	2,3	2,1	8,34	4,42	8,48	4,18	5,93	4,05	4,71	3,21

[1] revenu du ménage après impôt sous le seuil de faible revenu (SFR)
É.-T. = écart-type
Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

pendant la vie adulte, puis atteignait encore un sommet à 80 ans (8,39 µg/m³). La différence dans l'exposition entre deux années d'âge était < 0,50 µg/m³.

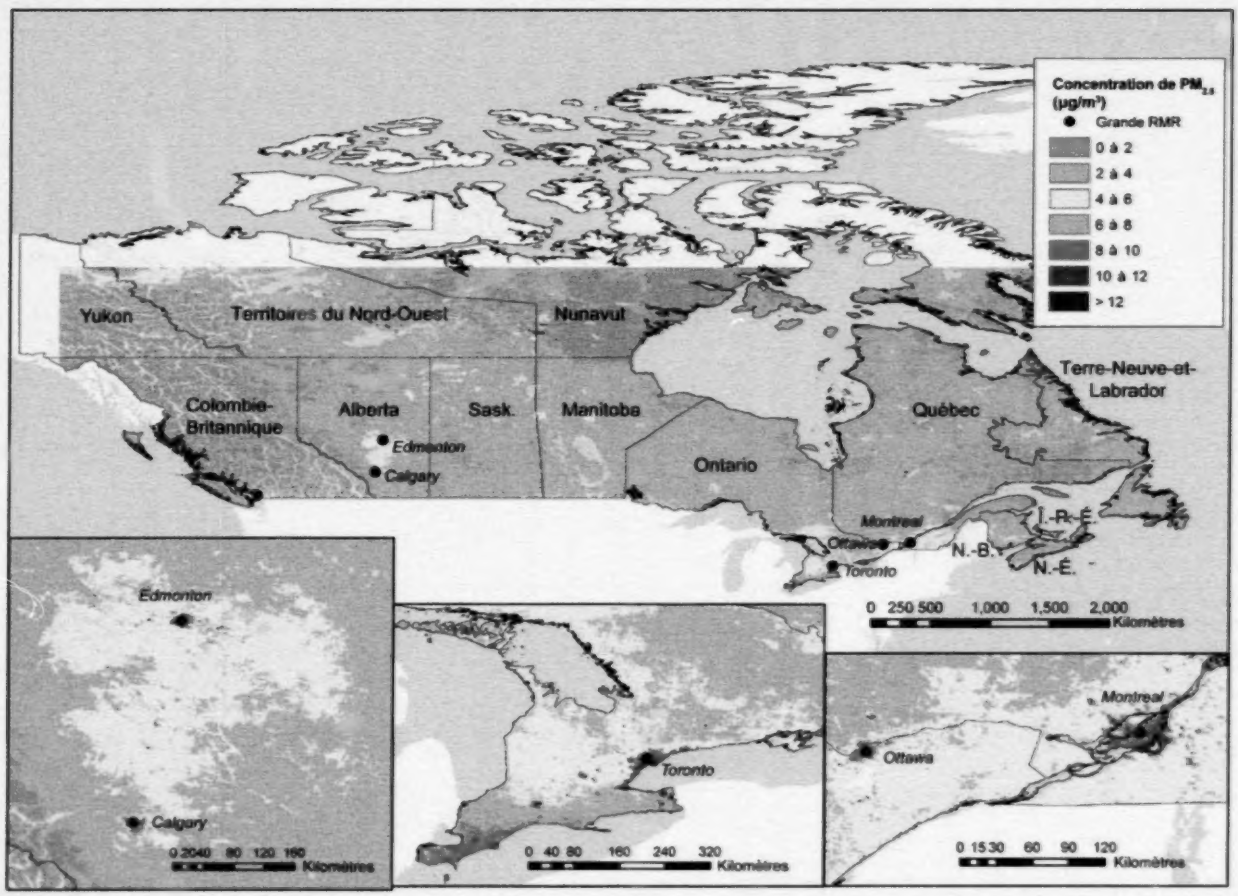
Minorités visibles et immigrants

À l'échelle nationale, l'exposition des minorités visibles aux $PM_{2,5}$ était plus élevée de 1,61 µg/m³ que celle de la population de race blanche ($p < 0,001$; $d = 0,32$)(tableau 1). Cependant, la quasi-totalité (96 %) de la population des minorités visibles vivait dans des noyaux urbains, comparativement à 66 % de la population de race blanche. Lorsque seuls les noyaux urbains étaient pris en considération, la différence était réduite à 0,69 µg/m³ ($p < 0,001$; $d = 0,15$). Les taux d'exposition les plus élevés dans les noyaux urbains se trouvaient parmi les Latino-Américains (8,95 µg/m³), les personnes de race noire (8,89 µg/m3) et les Arabes (8,87 µg/m³).

Le taux d'exposition aux $PM_{2,5}$ chez les Autochtones était inférieur de 1,55 µg/m³ à celui des personnes de race blanche ($p < 0,001$; $d = 0,33$).

Le taux d'exposition des immigrants aux $PM_{2,5}$ était plus élevé de 1,55 µg/m³ que celui des non-immigrants ($p < 0,001$; $d = 0,30$)(tableau 1). À l'instar des minorités visibles, un pourcentage beaucoup plus élevé d'immigrants (90 %) que de non-immigrants (65 %) vivaient dans des noyaux urbains. Parmi les habitants des noyaux urbains, la différence dans l'exposition entre les immigrants et les non-immigrants était de 0,82 µg/m³ ($p < 0,001$; $d = 0,18$) (tableau 1). Le taux d'exposition des immigrants des noyaux urbains aux $PM_{2,5}$ a atteint un sommet un an après leur immigration au Canada (8,94 µg/m³) et est demeuré élevé (8,41 µg/m³ à 8,80 µg/m³), sans jamais s'approcher de la moyenne pour la population non immigrante des noyaux urbains (7,81 µg/m³) (figure 2).

Carte 1
Modélisation des estimations de la pollution de l'air par les matières particulaires ($PM_{2,5}$), Canada, 2006



Source : A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

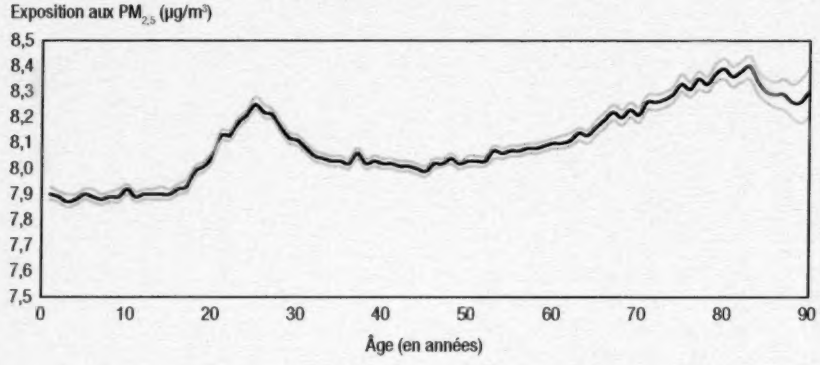
Revenu des ménages

Aucune association marquée n'a été dégagée entre le revenu du ménage et l'exposition aux $PM_{2,5}$ dans son ensemble. Toutefois, dans les noyaux urbains, le taux d'exposition était plus élevé (0,56 µg/m³; $p < 0,001$; $d = 0,11$) chez les personnes appartenant à des ménages à faible revenu comparativement à celles qui appartenaient à des ménages à revenu élevé; dans les régions rurales, leur taux d'exposition était plus faible (0,16 µg/m³; $p < 0,001$; $d = 0,05$) (tableau 1). L'exposition variait très peu selon l'état de participation à la population active ou le niveau de scolarité.

À l'échelle nationale, les personnes appartenant à des minorités visibles dans les ménages à faible revenu présentaient les taux d'exposition aux $PM_{2,5}$ les plus élevés: 8,86 µg/m³, soit 2,08 µg/m³ de plus que le taux des personnes de race blanche qui ne vivaient pas dans des ménages à faible revenu ($p < 0,001$; $d = 0,42$) (tableau 1).

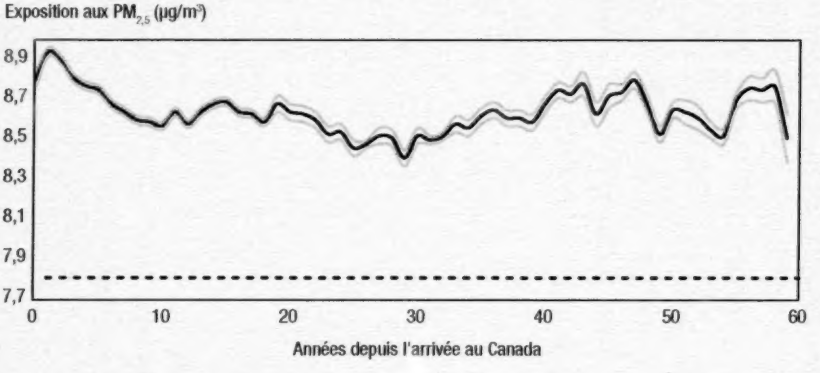
On a comparé le taux d'exposition aux $PM_{2,5}$ des populations de minorités visibles et de race blanche dont le revenu du ménage était similaire (figure 3). Le taux d'exposition n'a pas varié de façon marquée dans les banlieues urbaines et les régions rurales, mais dans les noyaux urbains, à tous les niveaux de revenu des ménages, les personnes appartenant à des minorités visibles étaient constamment plus exposées que les personnes de race blanche.

Figure 1
Moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$) avec un intervalle de confiance de 95 %, selon l'âge, population à domicile dans les noyaux urbains âgée de 0 à 90 ans, Canada, 2006



Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

Figure 2
Moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$) avec un intervalle de confiance de 95 %, selon le statut d'immigrant et les années depuis l'arrivée, population à domicile dans les noyaux urbains, Canada, 2006



Note : La ligne pointillée représente la moyenne d'exposition résidentielle parmi les non-immigrants qui habitent dans des noyaux urbains.

Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

Régions métropolitaines de recensement

La différence dans l'exposition aux $PM_{2,5}$ entre les minorités visibles à faible revenu et les personnes de race blanche à revenu élevé a été calculée pour chacune des RMR. Dans cinq RMR, on a observé une plus grande exposition chez les minorités visibles à faible revenu, mais dans la grande majorité des RMR, l'exposition était plus élevée parmi les personnes de race blanche à revenu élevé (tableau 2).

La moyenne d'exposition aux $PM_{2,5}$ (9,33 µg/m³) du noyau urbain de Toronto a dépassé la moyenne pour les noyaux urbains à l'extérieur de Toronto (7,68 µg/m³) (tableau 3). Parmi les résidents des noyaux urbains, 43 % qui appartenaient à des minorités visibles vivaient à Toronto, comparativement à 15 % des personnes de race blanche. De même, 40 % des immigrants des noyaux urbains vivaient à Toronto, comparativement à 14 % des non-immigrants.

Afin de mieux comprendre l'effet de l'exposition à Toronto, l'exposition aux $PM_{2,5}$ des résidents du noyau urbain de Toronto a été comparée à celle des résidents des autres noyaux urbains combinés. À Toronto, l'exposition était généralement similaire entre les personnes de race blanche et les populations de minorités visibles et entre les immigrants et les non-immigrants. Cependant, la différence dans les taux d'exposition aux $PM_{2,5}$ entre les résidents à faible revenu et ceux à revenu plus élevé était plus élevée à Toronto que dans les autres noyaux urbains.

Discussion

L'estimation de la moyenne nationale d'exposition aux $PM_{2,5}$ en 2006 (7,05 µg/m³) était quelque peu inférieure à l'estimation pour la période de 2001 à 2006 (8,7 µg/m³), qui était fondée sur un modèle antérieur de $PM_{2,5}$[3].

Dans la présente étude, l'exposition aux $PM_{2,5}$ était plus élevée de 1,61 µg/m³ dans le cas des minorités visibles (comparativement à la population de race blanche), et de 1,51 µg/m³ dans le cas des immigrants (comparativement aux non-immigrants). Cette disparité semble être attribuable, au moins en partie, aux pourcentages relativement élevés de minorités visibles et d'immigrants qui vivent dans les noyaux urbains. L'exposition des immigrants n'a pas diminué avec les années au Canada.

Les associations entre le revenu du ménage et l'exposition dépendaient de l'emplacement; dans les noyaux urbains, l'exposition aux $PM_{2,5}$ était associée positivement dans une faible mesure à la diminution du revenu. Lorsque l'on tenait également compte du statut de minorité visible, le taux d'exposition parmi les populations appartenant à des minorités visibles à faible revenu était supérieur de 2,08 µg/m³ à celui des personnes de race blanche à revenu élevé. Cependant, à l'échelle de la RMR, le taux d'exposition parmi les minorités visibles à faible revenu était plus élevé que parmi les personnes de race blanche à revenu élevé dans seulement une poignée de villes.

Une force particulière de cette étude est son plus grand ensemble de données sur la population au Canada (questionnaire détaillé du recensement). Les participants ont été jumelés à leur lieu de résidence et géocodés à l'aide du code postal pour donner lieu à un modèle spatial à très petite échelle relativement aux $PM_{2,5}$ (~1 km²). Les caractéristiques de population et les estimations de $PM_{2,5}$ ont été obtenues pour la même année (2006); elles fournissent ainsi une correspondance transversale relativement précise entre les deux ensembles de données.

Les conclusions soulignent les différences entre les États-Unis et le Canada en ce qui a trait aux schémas d'exposition à la pollution de l'air. Aux États-Unis, même si Clark et coll. ont analysé le NO_2 plutôt que les $PM_{2,5}$, ils ont également signalé des taux d'exposition plus élevés parmi les groupes de minorités visibles (comparativement à ceux de race blanche) et parmi les groupes à faible revenu[13]. De même, ils ont observé une faible association positive entre le revenu du ménage et la pollution de l'air dans les régions rurales, ainsi qu'une association négative dans les régions urbaines. Cependant, aux États-Unis aux niveaux des régions, des États, des comtés et des régions

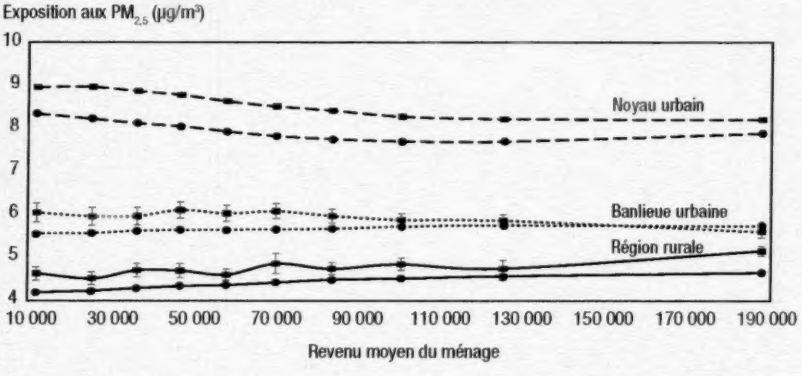
Ce que l'on sait déjà sur le sujet

- Des études sur certaines villes canadiennes et une étude nationale américaine concluent que certaines populations de minorités visibles et les gens à faible statut socioéconomique sont plus exposés au dioxyde d'azote (NO_2).
- Un autre polluant, les matières particulaires ($PM_{2,5}$), est associé à un risque accru de mortalité, mais les différences dans l'exposition au niveau de la population sont relativement inconnues.

Ce qu'apporte l'étude

- L'exposition aux $PM_{2,5}$ était plus élevée de 1,61 µg/m³ chez les personnes appartenant à une minorité visible que chez les personnes de race blanche, et de 1,55 µg/m³ chez les immigrants que chez les non-immigrants; ces différences étaient moins marquées dans les noyaux urbains, où habitent un grand pourcentage de minorités visibles et d'immigrants.
- À l'échelle nationale, aucune différence marquée dans l'exposition aux $PM_{2,5}$ selon le statut socioéconomique n'a été observée, mais dans les noyaux urbains, les résidents appartenant à des ménages à faible revenu étaient légèrement plus exposés que les personnes qui n'appartenaient pas à des ménages à faible revenu.
- Toronto a une grande influence sur les disparités, car elle présente un niveau très élevé de $PM_{2,5}$ (9,08 µg/m³), et 42 % de minorités visibles et 36 % d'immigrants y vivent.

Figure 3
Moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$), selon le statut de minorité visible, le lieu de résidence urbain/rural et le revenu du ménage, population à domicile, Canada, 2006



I = Intervalle de confiance de 95 %
■ = minorité visible
● = race blanche

Note : La ligne pointillée représente la moyenne d'exposition résidentielle parmi les non-immigrants qui habitent dans des noyaux urbains

Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

urbaines, la différence dans l'exposition au NO_2 entre les personnes à faible revenu autres que de race blanche et les personnes de race blanche à revenu élevé était habituellement positive et souvent relativement élevée[13]. En comparaison, dans la présente étude, les différences entre ces groupes étaient rares au niveau des villes; les différences à l'échelle nationale semblent être attribuables en grande partie à la concentration de minorités visibles dans les centres urbains qui présentent des niveaux élevés de $PM_{2,5}$.

Des études antérieures sur l'exposition à la pollution de l'air faisant appel à des données agrégées et à des techniques de régression spatiale ont été menées pour certaines villes canadiennes. Le faible revenu était associé à l'exposition au NO_2 à Toronto, à Vancouver et à Montréal, même si d'autres indicateurs de privation sociale et matérielle étaient aussi significatifs[9-11]. À titre d'exemple, on a observé une exposition accrue au NO_2 dans les quartiers de Montréal qui présentaient des pourcentages plus élevés d'adultes au chômage et de personnes vivant seules[9]. Toutes ces variables n'ont pas été prises en considération dans la présente étude sur l'exposition aux $PM_{2,5}$, même si les associations avec le niveau de scolarité et le statut de participation à la population active n'étaient pas apparentes à l'échelle nationale. Toutefois, les répartitions géographiques des $PM_{2,5}$ et du NO_2 ne sont pas les mêmes; il pourrait donc être inapproprié de s'attendre à des associations semblables entre les caractéristiques socioéconomiques et l'exposition. Une analyse des schémas nationaux d'exposition au NO_2 serait utile afin d'établir le lien entre les résultats de la présente étude et les travaux canadiens précédents sur le NO_2 et de permettre une meilleure comparaison avec les schémas que l'on trouve aux États-Unis. Il se pourrait que l'analyse du NO_2 plutôt que des $PM_{2,5}$ à l'échelle de la RMR révèle des schémas d'exposition similaires à ceux des États-Unis[13].

Tableau 2
Moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$), selon le statut de faible revenu, le statut de minorité visible, et la région métropolitaine de recensement (RMR), population de la RMR à domicile, Canada, 2006

	Exposition aux $PM_{2,5}$ (µg/m³)						
	Total		Personne de couleur à faible revenu (CFR)		Personne de race blanche à revenu élevé (BRE)		Différence
Région métropolitaine de recensement	Moyenne	É.-T.	Moyenne	É.-T.	Moyenne	É.-T.	(CFR - BRE)
St. John's	4,49	3,06	5,04	3,07	4,61	3,02	0,43
Vancouver	7,37	3,14	7,77	2,84	7,34	3,03	0,43
Kingston	6,33	4,40	6,93	3,60	6,71	4,58	0,23
St. Catharines–Niagara	10,40	4,75	10,85	4,57	10,65	4,65	0,20
Montréal	8,94	7,93	9,22	7,79	9,20	8,78	0,02
Kelowna	6,63	4,43	6,81	3,81	6,84	4,66	-0,03
Victoria	6,92	3,32	7,13	2,96	7,15	3,21	-0,03
Moncton	4,76	2,43	4,89	2,35	4,97	2,61	-0,08
Thunder Bay	5,67	2,74	5,74	2,57	5,92	2,49	-0,18
Grand Sudbury	6,24	3,91	6,43	4,22	6,62	4,08	-0,18
Halifax	4,74	2,90	4,65	2,67	4,89	2,85	-0,24
Winnipeg	5,90	2,47	5,83	2,09	6,10	2,28	-0,27
Québec	8,17	4,90	8,35	4,70	8,68	5,12	-0,33
Saguenay	6,07	3,50	5,96[E]	3,18	6,29	3,55	-0,33[E]
London	9,43	4,05	9,55	3,76	9,89	3,67	-0,34
Ottawa–Gatineau	6,84	4,18	6,82	3,86	7,18	4,22	-0,36
Saint-Jean	5,07	2,77	4,87	2,78	5,26	2,92	-0,39
Saskatoon	4,74	5,23	4,64	3,81	5,06	5,57	-0,42
Peterborough	6,00	4,41	6,07	3,90	6,51	4,58	-0,43
Regina	4,63	2,73	4,48	2,62	4,98	2,59	-0,50
Abbotsford–Mission	7,07	3,43	6,99	2,99	7,54	3,52	-0,55
Brantford	8,70	4,05	8,59	3,73	9,15	3,97	-0,56
Windsor	10,39	4,44	10,33	4,03	10,89	4,46	-0,56
Edmonton	7,45	4,04	7,33	3,71	7,89	3,84	-0,56
Toronto	9,08	4,20	8,84	4,03	9,41	4,16	-0,58
Calgary	7,35	3,91	7,20	3,95	7,80	3,34	-0,60
Sherbrooke	7,07	3,30	6,78	2,86	7,39	3,23	-0,61
Hamilton	9,33	4,32	9,20	4,29	9,86	3,90	-0,66
Guelph	7,29	4,07	7,14	3,83	7,83	3,89	-0,68
Barrie	5,47	3,68	5,01	3,26	5,72	3,82	-0,72
Oshawa	8,57	4,32	8,29	4,30	9,01	3,95	-0,72
Kitchener–Cambridge–Waterloo	8,38	3,91	7,91	4,02	8,87	3,56	-0,95
Trois-Rivières	7,09	4,88	6,31[E]	3,29	7,48	5,37	-1,17[E]

[E] à utiliser avec prudence
É.-T. = écart-type
Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

De légères variations des concentrations de $PM_{2,5}$ peuvent avoir des répercussions considérables sur la santé des populations. Pinault et coll.[4] a documenté une association entre la mortalité non accidentelle, attribuable à un trouble circulatoire ou respiratoire et les $PM_{2,5}$ dans une cohorte canadienne ajustée pour les covariables socioéconomiques, écologiques et comportementales avec une répartition d'exposition relativement faible (moyenne = 6,3 µg/m³).

Il se peut que les courbes concentration-réponse (et les relations du modèle de survie) des études de la population en général ne s'appliquent pas à certaines sous-populations. Les différences dans l'exposition constituent un élément important du cadre de « triple danger », où les gens qui souffrent des pires privations pourraient subir des conséquences liées à la pollution de l'air disproportionnées sur la santé en raison d'une combinaison des éléments suivants : 1) faible statut socioéconomique (et stress connexe); 2) exposition accrue à la pollution de l'air; 3) modification des effets sur la santé de la pollution de l'air en raison du faible statut socioéconomique et, possiblement, du stress accru[9, 20, 21].

Il serait utile d'examiner les associations concentration-réponse parmi les groupes identifiés dans cette étude comme étant plus exposés aux $PM_{2,5}$ afin de déterminer si, effectivement, ils réagissent plus fortement. Dans une étude, on a observé une plus forte association concentration-réponse parmi les Canadiens du quintile de revenus les plus bas[22], ce qui laisse supposer qu'une modification de l'effet pourrait être possible parmi d'autres groupes.

Limites

La méthode d'évaluation de l'exposition aux $PM_{2,5}$ de la présente analyse comporte de nombreuses limites. Le programme FCCP+ est précis à plus ou moins un côté d'îlot (quelques ménages) dans la plupart des régions urbaines, mais il est moins précis dans les régions rurales[16]. Dans une certaine mesure, ce manque de précision pourrait être atténué, car les taux de $PM_{2,5}$ sont uniformément plus faibles dans les régions rurales que dans les centres urbains. De plus amples recherches sont requises afin de déterminer l'étendue de la classification erronée de l'exposition dans les régions rurales lorsque le programme FCCP+ est utilisé.

L'utilisation d'estimations ponctuelles résidentielles pour la pollution de l'air[3,4,22] donne uniquement une estimation approximative du vrai taux d'exposition. L'exposition a lieu à l'extérieur de la maison, par exemple dans les déplacements et dans le lieu de travail. L'inclusion de l'exposition dans le lieu de travail pourrait améliorer les estimations. En raison des limites des données, la présente étude n'a pu tenir compte des différences liées à la profession et au comportement qui augmenteraient l'exposition à la pollution de l'air.

L'étude se fondait sur les estimations de $PM_{2,5}$ tirées d'un modèle de régression de l'utilisation des terres (RUT). Même si le modèle a été validé à l'aide de mesures fondées sur le sol, il contribue probablement à la classification erronée de l'exposition, lorsqu'on le compare aux mesures directes.

Mot de la fin

En 2006, la moyenne nationale d'exposition aux $PM_{2,5}$ était de 7,05 µg/m³. L'estimation moyenne pour les noyaux urbains était de 8,03 µg/m³, comparativement à 5,62 µg/m³ pour les banlieues urbaines et à 4,32 µg/m³ pour les régions rurales. Les estimations d'exposition étaient très élevées dans certaines parties du sud de l'Ontario (particulièrement près de Toronto et de Windsor) et dans les grandes villes. L'exposition aux $PM_{2,5}$ était plus élevée dans le cas des populations de minorités visibles (comparativement aux populations de race blanche) et dans le cas des immigrants (comparativement aux non-immigrants). Ces différences dans l'exposition étaient plus faibles lorsque l'on tenait compte de l'emplacement du logement (par exemple, le noyau urbain). L'exposition parmi les immigrants urbains n'a pas diminué de façon significative avec le temps depuis l'immigration. Dans les noyaux urbains, les résidents appartenant à des ménages à faible revenu présentaient des taux d'exposition légèrement plus élevés que les personnes qui n'appartenaient pas à des ménages à faible revenu.

Tableau 3
Pourcentage de répartition et moyenne d'exposition résidentielle aux matières particulaires ($PM_{2,5}$), selon le lieu de résidence Toronto/pas Toronto et certaines caractéristiques, population des ménages dans les noyaux urbains, 2006

	Répartition de la population dans les noyaux urbains (%)				Exposition aux $PM_{2,5}$ (µg/m³)					
					Total		Toronto		Pas Toronto	
Caractéristique	Total	Total	Toronto	Pas Toronto	Moyenne	É.-T.	Moyenne	É.-T.	Moyenne	É.-T.
Total	100,0	100,0	21,0	79,0	8,03	4,90	9,33	3,56	7,68	4,91
Minorité visible ou statut d'Autochtone										
Race blanche	75,3	100,0	14,9	85,1	7,89	5,05	9,43	3,55	7,63	5,03
Autochtone	2,3	100,0	4,2	95,8	7,00	4,74	9,59	3,43	6,89	4,63
Minorité visible	22,4	100,0	43,3	56,7	8,58	4,10	9,21	3,55	8,09	4,16
Sud-Asiatiques	5,6	100,0	54,4	45,6	8,46	4,14	8,95	3,87	7,87	4,05
Chinois	5,4	100,0	40,4	59,6	8,48	3,75	9,26	3,06	7,95	3,69
Noirs	3,4	100,0	45,6	54,4	8,89	4,18	9,36	3,56	8,49	4,44
Philippins	1,8	100,0	41,8	58,2	8,37	4,17	9,32	3,36	7,68	4,00
Latino-Américains	1,3	100,0	33,1	66,9	8,95	4,19	9,69	3,24	8,59	4,36
Arabes	1,2	100,0	20,1	79,9	8,87	4,05	9,29	3,57	8,77	4,13
Autre origine asiatique	2,7	100,0	36,5	63,5	8,47	4,30	9,41	3,40	7,92	4,28
Minorités visibles multiples	0,6	100,0	45,4	54,6	8,46	4,24	9,13	3,66	7,91	4,27
Autre minorité visible	0,3	100,0	66,3	33,7	8,83	4,22	9,17	3,81	8,18	4,57
Statut d'immigration										
Non-immigrant	73,5	100,0	14,3	85,7	7,81	5,02	9,30	3,69	7,56	5,00
Immigrant	26,5	100,0	39,5	60,5	8,63	4,26	9,36	3,41	8,15	4,41
Revenu du ménage ($)										
Moins de 30 000	17,6	100,0	18,4	81,6	8,37	4,79	9,74	2,77	8,06	4,87
30 000 à 50 000	17,9	100,0	18,5	81,5	8,21	4,89	9,55	3,15	7,90	4,94
50 000 à 90 000	30,9	100,0	19,5	80,5	7,96	4,95	9,29	3,62	7,63	4,94
Plus de 90 000	33,7	100,0	25,0	75,0	7,82	4,87	9,11	3,82	7,38	4,79
Statut de faible revenu[†]										
Faible revenu	13,5	100,0	23,6	76,4	8,52	4,57	9,64	3,00	8,17	4,68
Pas un faible revenu	85,8	100,0	20,7	79,3	7,96	4,96	9,27	3,65	7,61	4,96

É.-T. = écart-type
[†] revenu du ménage après impôt sous le seuil de faible revenu (SFR)
Sources : Recensement du Canada de 2006; A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr et al., « High-resolution satellite-derived $PM_{2,5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », *Environmental Science and Technology*, 49(17), 2015, p. 10482-10491.

Références

1. GBD 2013 Risk Factors Collaborators, « Global, regional and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013 », *Lancet*, 386(10010), 2015, p. 2287-2323.
2. S.S. Lin, T. Vos, A.D. Flaxman *et al.*, « A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 », *Lancet*, 380, 2012, p. 2224-2260.
3. D.L. Crouse, P.A. Peters, A. van Donkelaar *et al.*, « Risk of non-accidental and cardiovascular mortality in relation to long-term exposure to low concentrations of fine particulate matter: A Canadian national-level cohort study », Environmental Health Perspectives, 120, 2012, p. 708-714.
4. L. Pinault, M. Tjepkema, D.L. Crouse *et al.*, « Risk estimates of mortality attributed to low concentrations of ambient fine particulate matter in the Canadian Community Health Survey cohort », *Environmental Health*, 15, 2016, p. 18.
5. D.L. Crouse, M.S. Goldberg et N.A. Ross, « A prediction-based approach to modelling temporal and spatial variability of traffic-related air pollution in Montreal, Canada », *Atmospheric Environment*, 43(32), 2009, p. 5075-5084.
6. M. Jerrett, M.A. Arain, P. Kanaroglou *et al.*, « Modeling the intraurban variability of ambient traffic pollution in Toronto, Canada », *Journal of Toxicology and Environmental Health A*, 70(3-4), 2007, p. 200-212.
7. R. Wang, S.B. Henderson, H. Sbihi *et al.*, « Temporal stability of land use regression models for traffic-related air pollution », *Atmospheric Environment*, 64, 2013, p. 312-319.
8. L. Deville Cavellin, S. Weichenthal, R. Tack *et al.*, « Investigating the use of portable air sensors to capture the spatial variability of traffic-related air pollution », *Environmental Science and Technology*, 50(1), 2016, p. 313-320.
9. D.L. Crouse, N.A. Ross et M.S. Goldberg, « Double burden of deprivation and high concentrations of ambient air pollution at the neighbourhood scale in Montreal, Canada », *Social Science and Medicine*, 69, 2009, p. 971-981.
10. M. Buzzelli et M. Jerrett, « Geographies of susceptibility and exposure in the city: environmental inequity of traffic-related air pollution in Toronto », *Canadian Journal of Regional Science*, 30, 2007, p. 195-210.
11. L. Pinault, D. Crouse, M. Jerrett *et al.*, « Spatial associations between socioeconomic groups and NO_2 air pollution exposure within three large Canadian cities », *Environmental Research*, 147, 2016, p. 373-382.
12. L. Pinault, D. Crouse, M. Jerrett *et al.*, « Différences d'ordre socioéconomique dans l'exposition à la pollution de l'air ambiant par le dioxyde d'azote chez les enfants des trois plus grandes villes canadiennes », *Rapports sur la santé*, 27(7), 2016, p. 3-9.
13. L.P. Clark, D.B. Millet et J.D. Marshall, « National patterns in environmental injustice and inequality: outdoor NO_2 air pollution in the United States », *PLOS One*, 9(4), 2014, p. e94431.
14. Statistique Canada, *Dictionnaire du Recensement de 2006, année de recensement 2006* (nº 92-566-X au catalogue) Ottawa, Statistique Canada, 2010.
15. Statistique Canada, *Rapport technique du Recensement de 2006 : Couverture*, Ottawa, Statistique Canada, Cat. nº 92-567-X, 2010.
16. R. Wilkins et P.A. Peters, « *PCCF+ Version 5K* Guide de l'utilisateur, Logiciel de codage géographique basé sur les Fichiers de conversion des codes postaux de Statistique Canada mises à jour en mai 2011* », 2012 (Statistique Canada, nº 82F0086-XDB au catalogue).
17. A. van Donkelaar, R.V. Martin, R.J.D. Spurr *et al.*, « High-resolution satellite-derived $PM_{2.5}$ from optical estimation and geographically weighted regression over North America », Environmental Science and Technology, 49(17), 2015, p. 10482-10491.
18. J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences, Second Edition*, Hillsdale, Lawrence Earlbaum Associates, 1988.
19. G.M. Sullivan et R. Feinn, « Using effect size – or why the P value is not enough », *Journal of Graduate Medical Education*, 4(3), 2012, p. 279-282.
20. M. Jerrett, R.T. Burnett, P. Kanaroglou *et al.*, « A GIS-environmental justice analysis of particulate air pollution in Hamilton, Canada », *Environment and Planning A*, 33, 2001, p. 955-973.
21. M. Buzzelli, « Bourdieu does environmental justice? Probing the linkages between population health and air pollution epidemiology », *Health & Place*, 13, 2007, p. 3-13.
22. D.L. Crouse, P.A. Peters, P. Hystad *et al.*, « Ambient $PM_{2.5}$, O_3, and NO_2 exposures and associations with mortality over 16 years of follow-up in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC) », *Environmental Health Perspectives*, 123, 2015, p. 1180-1186.